

Департамент научно-технической политики и развития РАО «ЕЭС России»

Новосибирский государственный технический университет

Сибирская энергетическая академия

Производственное научное предприятие «Болид»

ОАО «СибНИИЭ»

ЗАО «Феникс-88»

*Посвящается 40-летию факультета энергетики  
Новосибирского государственного технического университета*

# **ОГРАНИЧЕНИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ И РЕЖИМЫ ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ СЕТЕЙ 6–35 кВ**

**ТРУДЫ ВТОРОЙ ВСЕРОССИЙСКОЙ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

**15–17 октября 2002 года  
Новосибирск**

ББК 31.279.1

УДК 621.316.92+621.311.1.027.5

П 27

Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6–35 кВ  
Труды Второй Всероссийской научно-технической конференции.  
Новосибирск, 2002. – 200 с.

ISBN 5-93889-020-9

*Редакционная коллегия:*

Кадомская К.П., д-р тех. наук, проф. (отв. редактор)  
Сарин Л.И. (зам. отв. редактора)  
Виштибеев А.В., канд. тех. наук (ученый секретарь)  
Емельянов Н.И., канд. тех. наук, доц.  
Заболотников А.П., канд. тех. наук

*Рецензенты:*

Манусов В.З., д-р тех. наук, проф.  
Горелов В.П., д-р тех. наук, проф.

Представленные доклады посвящены режимам заземления нейтрали электрических сетях 6–35 кВ различного конструктивного исполнения и назначения. Рассматриваются способы ограничения всех видов перенапряжений (коммутационных, дуговых, грозовых), параметры и конструктивное исполнение устройств для ограничения перенапряжений. Анализируется опыт эксплуатации сетей 6–35 кВ с использованием устройств для ограничения перенапряжений.

## СОДЕРЖАНИЕ

### Раздел I

#### Сравнительная эффективность различных способов заземления нейтрали

Г.А. Евдокунин

|  |    |
|--|----|
| Анализ внутренних перенапряжений в сетях 6–10 кВ и обоснование необходимости перевода сетей в режим с резистивным заземлением нейтрали ..... | 9  |
| Н.В. Даки, С.Н. Великий, А.А. Челазнов   |    |
| Режимы заземления нейтрали сетей 6–10 кВ ОАО «Газпром» .....   | 13 |
| Н.А. Зыков, Т.А. Стогний   |    |
| О режиме заземления нейтрали в сетях СН электростанций .....   | 23 |

### Раздел II

#### Эффективность резистивного заземления нейтрали в электрических сетях 6–35 кВ различного конструктивного исполнения и назначения

М.В. Ильиных, Л.И. Сарин, В.И. Павлов, С.М. Асосков, А.А. Лыков

|   |    |
|---|----|
| Оценка эффективности применения высокоомных резисторов по результатам опытов искусственного ОДЗ в сети 10 кВ КС «Давыдовская» ООО «Мострансгаз» ..... | 31 |
| Л.И. Сарин, М.В. Ильиных, Н.Г. Царегородцев, Н.И. Емельянов   |    |
| Высоковольтные резисторы заземления нейтрали типа РЗ. Опыт эксплуатации .....   | 36 |
| М.В. Ильиных, Л.И. Сарин, В.И. Кучеренко, Д.В. Багаев, И.И. Хуртов  |    |
| Внедрение резисторов в сети собственных нужд ТЭЦ-3 ОАО «Саратовэнерго» .....  | 40 |
| М.В. Ильиных, Л.И. Сарин, Н.А. Дарков, Б.И. Тагильцев, В.И. Ваганов, Д.С. Кудряшов  |    |
| Ограничения высокоомными резисторами перенапряжений при ОДЗ в сети 35 кВ ПС «Тяжинская» ОАО «Кузбассэнерго» .....                                     | 45 |
| М.В. Ильиных, Л.И. Сарин, А.А. Челазнов   |    |
| Применение высокоомных резисторов в сети с компенсированной нейтралью .....   | 49 |
| С.М. Коробейников, Л.И. Сарин, А.А. Челазнов  |    |
| Резистор с частотной зависимостью для уменьшения перенапряжений .....   | 52 |
| Ю.В. Целебровский   |    |
| Выбор сопротивления резистора в нейтрали по условиям электробезопасности .....  | 59 |
| А.И. Шалин, Ю.В. Целебровский, А.И. Щеглов  |    |
| Особенности резистивного заземления в городских сетях 10 кВ .....   | 63 |
| А.И. Гаврилко   |    |

|   |    |
|---|----|
| Анализ технических мероприятий по ограничению перенапряжений при замыканиях на землю в сети 6 кВ собственных нужд электростанций .....  | 68 |
| А.С. Зубков, К.П. Кадомская   |    |
| Повышение надежности эксплуатации изоляции сетей средних классов напряжения, содержащих двухцепные воздушные линии, оснащением нейтралей сетей высокоомными резисторами ..... | 73 |
| А.В. Виштибеев, Н.И. Емельянов, М.В. Ильиных, Л.И. Сарин  |    |
| О длительности работы резистора для заземления нейтрали в электрических сетях 6–35 кВ .....   | 78 |
| В.И. Виштибеев, А.В. Виштибеев, В.В. Дубровский   |    |
| К вопросу об учете токов небаланса при выборе уставок токовых защит от 033 .....  | 81 |
| А.В. Виштибеев  |    |
| Эффективность резистивного заземления нейтрали в кабельных электрических сетях 6–10 кВ .....  | 84 |

### **Раздел III**

#### **Эффективность резонансного заземления нейтрали в электрических сетях 6–35 кВ различного конструктивного исполнения и назначения**

*А.М.Брянцев, Б.И.Базылев, В.В.Базуткин, А.Г.Долгополов*

К проблеме компенсации емкостных токов в сетях 6–10–35 кВ ..... 97

*Д.И.Никонов*

Опыт эксплуатации сетей с компенсированной нейтралью в ОАО «Башкирэнерго» ..... 103

*М.П.Дергилев, В.К.Обабков*

Перенапряжения в сетях 6–10 кВ с двигательной нагрузкой при различных способах заземления нейтрали ..... 106

*Н.П.Гуров, В.Г.Сажаев, В.К.Обабков*

Перенапряжения в кабельной сети 6 кВ с большими емкостными токами и борьба с ними средствами резонансного заземления нейтрали ..... 112

### **Раздел IV**

#### **Перенапряжения в сетях средних классов напряжения (моделирование и экспериментальные исследования)**

*С.М.Коробейников, Л.И.Сарин, М.В.Ильиных*

Особенности пробоя воздушного промежутка в опытах искусственного ОДЗ при различных режимах заземления нейтрали ..... 123

*С.В.Нестеров, А.И.Щеглов, Ю.В.Целебровский*

Анализ осцилограмм токов и напряжений при однофазных дуговых замыканиях в сети 10 кВ с резистивным заземлением нейтрали ..... 127

*В.Е.Дмитриев, В.Н.Ларионов, А.И.Лавринец*

Испытания силикатного изоляционного покрытия токоведущих и конструктивных элементов в КРУ 10 кВ ..... 132

*В.Е.Качесов, Ю.А.Лавров, А.Г.Овсянников, В.Н.Ларионов, Д.Е.Павлик*

О мониторинге распределительных сетей ..... 136

*Н.Д.Кузнецов, И.Л.Дегтярёв*

Перенапряжения при коммутациях высоковольтных электродвигателей вакуумными выключателями ..... 142

*И.Л.Дегтярев, К.П.Кадомская, Р.В.Копылов*

Режимы заземления нейтрали и защита от перенапряжений электрических сетей с вращающимися электрическими машинами ..... 147

*А.В.Портнягин, И.Ф.Суворов*

Моделирование коммутационных перенапряжений при отключении электродвигателя в сети 6 кВ ..... 152

### **Раздел V**

#### **Повышение надежности эксплуатации изоляции электрических сетей при установке нелинейных ограничителей перенапряжений и RC-цепочек**

*О.А.Аношин, Е.Н.Красильников*

Повышение надежности работы электрических сетей на основе глубокого ограничения внутренних перенапряжений ..... 157

*О.А.Аношин*

Повышение надежности эксплуатации ограничителей перенапряжений в электрических сетях 6–10 кВ ..... 159

|  |     |
|--|-----|
| <i>Г.А. Евдокуин, С.С. Титенков</i>  |     |
| О методических указаниях по применению нелинейных ограничителей перенапряжений в сетях 6–35 кВ .....                                     | 162 |
| <i>Ю.Ф. Васюра, А.В. Вильнер, А.В. Вычегжанин</i>  |     |
| Результаты экспериментальных исследований и опыта эксплуатации нелинейных ограничителей перенапряжений в сетях 6–10 кВ .....             | 165 |
| <i>А.А. Безносов, Е.А. Борисов, К.П. Кадомская</i>   |     |
| Моделирование ограничителей перенапряжений при воздействии срезанных грозовых волн и высокочастотных коммутационных перенапряжений ..... | 170 |
| <i>А.П. Заболотников, Л.И. Сарин, Б.И. Тагильцев</i>   |     |
| Анализ повреждений ограничителей перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в «Кузбассэнерго» .....                                  | 175 |
| <i>А.П. Заболотников</i>   |     |
| Выбор ограничителей перенапряжений для сетей 6–35 кВ .....   | 177 |
| <i>С.В. Кузьмин, А.И. Кожин</i>  |     |
| Анализ коммутационных перенапряжений в сетях 6–10 кВ угольных разрезов .....   | 183 |

#### **Раздел VI** **Релейная защита в электрических сетях 6–35 кВ**

|  |     |
|--|-----|
| <i>А.И. Гаврилко</i>   |     |
| Комплекс токовых защит нулевой последовательности для сетей собственных нужд электростанций .....                        | 191 |
| <i>С.И. Головко, Р.А. Вайнштейн, В.В. Шестакова, С.М. Юдин</i>   |     |
| Опыт разработки защиты от замыканий на землю в электроустановках с компенсацией емкостного тока замыкания на землю ..... | 196 |
| <i>В.О. Столбов, С.Н. Розова, И.Ф. Суворов</i>   |     |
| Исследование электромагнитной совместимости трансформатора напряжения типа НТМИ с изоляцией в сетях 6–10 кВ .....        | 198 |

## **Раздел III**

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕЗОНАНСНОГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ  
НЕЙТРАЛИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 6–35 кВ  
РАЗЛИЧНОГО КОНСТРУКТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ  
И НАЗНАЧЕНИЯ**

## Перенапряжения в сетях 6–10 кВ с двигательной нагрузкой при различных способах заземления нейтрали

**М.П.Дергилев (Донецкий национальный технический университет)**  
**В.К.Обабков (ООО ВП «Наука, техника, бизнес в энергетике», г.Екатеринбург)**

Опыт эксплуатации распределительных сетей 6–10 кВ с двигательной нагрузкой свидетельствует о большой повреждаемости электрооборудования. Особенно это касается электродвигателей, имеющих, как известно, меньшие конструктивные запасы электрической прочности. Одной из главных причин отказов электрооборудования является повреждение изоляции из-за высокочастотных составляющих (ВЧС) перенапряжений. Причем наибольшую опасность при эксплуатации рассматриваемых сетей представляют дуговые (перемежающиеся) однофазные замыкания на землю (ОЗЗ). Появление их, как правило, связано с высокой вероятностью возникновения многоместных пробоев изоляции, сопровождающихся групповым отключением технологического оборудования [1–4].

В связи со сложностью системного анализа резонансных перенапряжений методами математического моделирования в данной работе использован экспериментальный метод исследования на низковольтной стеновой установке, моделирующей волновые процессы в сети с двигательной нагрузкой.

Вопросам изучения перенапряжений в сетях 3–35 кВ традиционно уделяется большое внимание. В частности, накоплен большой теоретический и экспериментальный материал по перенапряжениям при дуговых ОЗЗ. Общим для этих исследований является определение максимальных перенапряжений на неповрежденных фазах, а также на поврежденной фазе при восстановлении рабочего напряжения в моменты подзаряда распределенной емкости. Однако в режиме ОЗЗ подзаряд емкости сети чередуется, как известно, с процессами разряда емкостей поврежденной фазы и неповрежденных фаз через место пробоя изоляции, что при исследованиях не принималось во внимание. Неучет нагрузки при оценке перенапряжений в сети также приводит к бесконтрольным режимам, опасным для изоляции высоковольтных электродвигателей.

Объектом исследования является система *кабель – электродвигатель*, в которой возникает петля, образованная поврежденной фазой питающего кабеля и обмоткой электродвигателя. Число таких петель в сети соответствует числу присоединений. Каждая петля в момент разряда элементов поврежденной фазы представляет колебательный контур, в котором при определенном соотношении параметров может наступить высокочастотный резонанс с большой кратностью перенапряжений. Многочисленные измерения, выполненные в электрических сетях, показывают, что характер переходных процессов и величина перенапряжений определяются параметрами петель и суммарной емкостью сети по отношению к земле. Это позволило при выборе схемы физического моделирования сети ограничиться минимальным числом присоединений, позволяющим получить достоверные данные о влиянии параметров присоединения на характер переходных процессов в разрядных контурах. Принципиальная электрическая схема такой модели (рис.1) состоит из трех присоединений, два из которых выполнены по радиальной схеме питания потребителей и одно – по магистральной, характерной для распределительных сетей карьеров. Каждое присоединение моделирует кабельную линию длиной 1000 м и подключенный к ней электродвигатель. Модель кабеля состоит из системы П-образных *RLC*-цепочек, индуктивности которых выполнены в виде катушек, намотанных на ферромагнитные кольца с большой магнитной проницаемостью. Емкости линии имитируются

конденсаторами, а активные сопротивления — омическим сопротивлением самих катушек и последовательно включенных с ними резисторов. Цепочка линии воспроизводит 100 м кабеля с сечением жил от 70 до 240 мм<sup>2</sup>. В качестве нагрузки использованы различные асинхронные электродвигатели мощностью от 3 до 4,7 кВт.

Для исследования переходных процессов внутри самой машины статорные обмотки снабжены отпайками на расстоянии 7, 16, 25, 50, 75, 87 и 100% от начала у одного из электродвигателей и 4, 15, 25, 50, 75 и 100% у другого. Питание модели осуществляется от трансформатора 0,4/0,4 кВ, мощностью 15 кВ·А со схемой соединения обмоток Y/Y/Δ, что позволяет воспроизводить условия работы реальной сети с изолированной нейтралью и осуществлять длительный режим ОЗЗ при проведении исследований. Кроме того, модель снабжена обобщенной нагрузкой, позволяющей смоделировать электрическую сеть с током замыкания от 3 до 30 А.

Процесс дугового ОЗЗ имитируется с помощью схемы (рис.1), выполненной на базе управляемого тиристора, включенного в диагональ выпрямительного моста из вентилей. Управление тиристором осуществляется специальным формирователем импульсов (ФИ), позволяющим в широком диапазоне регулировать угол зажигания и длительность ОЗЗ. Применение такого устройства дает возможность при минимальной затрате времени в достаточном объеме воспроизводить быстропротекающие непериодические процессы, наблюдаемые в сетях с изолированной нейтралью при перемежающихся ОЗЗ и получать их на экране обычного осциллографа типа С1-54 в виде стоячих изображений. Наиболее типичные случаи влияния различных факторов на характер переходных процессов и величину перенапряжений, наблюдавшихся при проведении опытов, фотографировались с экрана осциллографа.

Адекватность процессов в модели и реальной сети обеспечивается теорией подобия и моделирования электроэнергетических систем [5]. Главное внимание при этом уделялось совпадению частотных параметров и постоянных затуханий в реальных и моделируемых элементах сети. Параметры переходных процессов как для отдельных

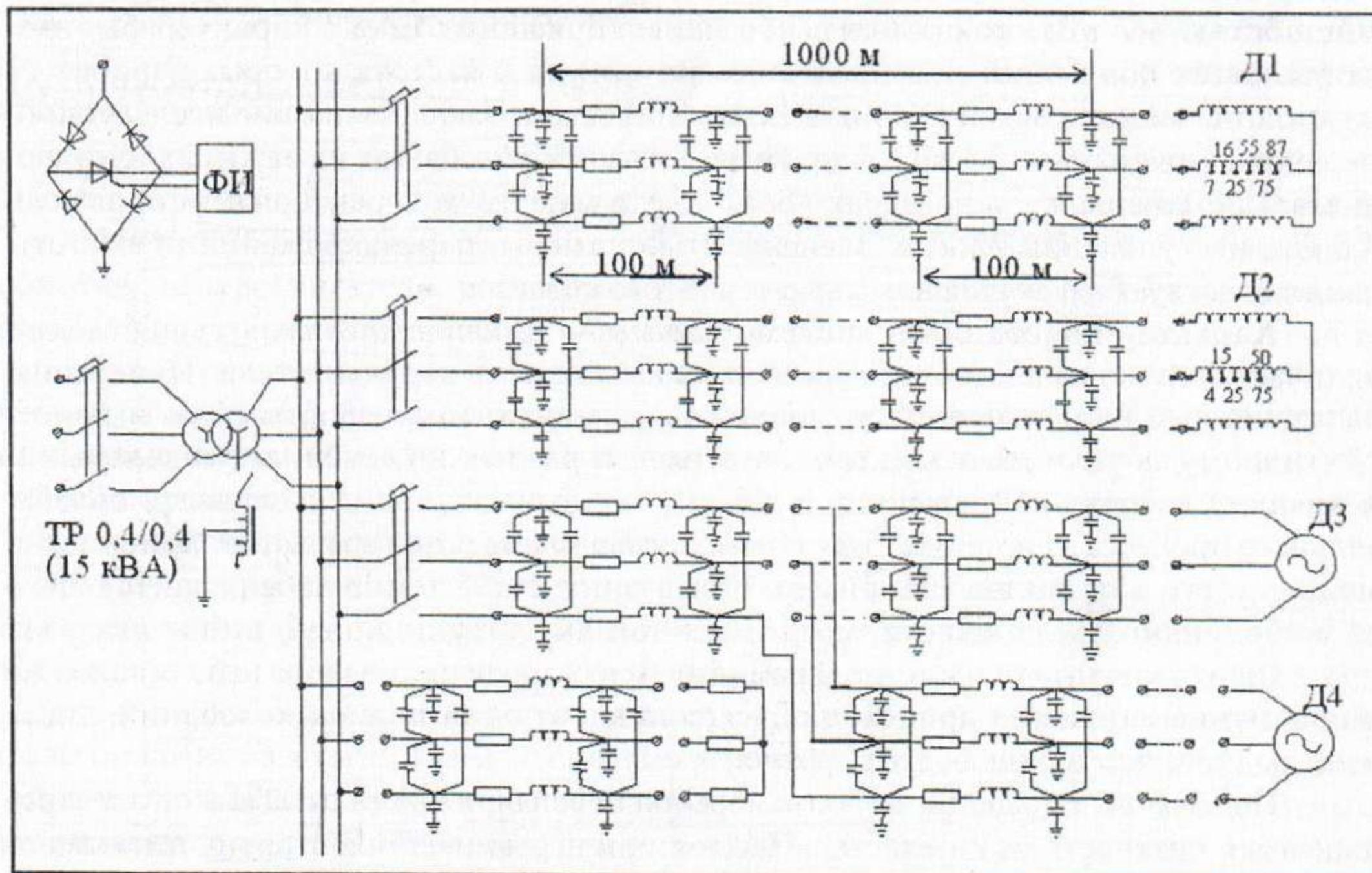


Рис.1. Схема моделирующей установки электрической сети 6 кВ

элементов сети, так и для всей системы в целом определялись экспериментальным путем.

Исследования показывают, что величина перенапряжений на неповрежденных фазах не зависит от места ОЗЗ, а при прочих равных условиях определяется величиной, наложенной ВЧС на установившееся напряжение неповрежденной фазы относительно земли. Частота этих колебаний зависит от параметров сети и для моделируемых сетей составляет от сотен герц до нескольких килогерц. Максимальная кратность перенапряжений составила  $3,2 U_{\Phi}$ , при этом на второй неповрежденной фазе она равнялась  $2,4 U_{\Phi}$ .

Напряжение между нулевой точкой и землей имеет также вид ВЧ-колебаний, наложенных на напряжение смещения нейтрали, но, в отличие от напряжения на неповрежденных фазах, оно здесь заметно выше. Поэтому при традиционно используемых шлейфовых осциллографах с механической разверткой эти колебания практически не фиксируются, в то время как вызываемые ими перенапряжения достигают двух и более кратных величин.

При экспериментах устройство воспроизведения дугового ОЗЗ подключалось к разным точкам сети, а осциллографирование процессов проводилось на элементах сети вдоль поврежденной фазы, в том числе и на отпайках статорных обмоток электродвигателей. При этом моделировались сети, эквивалентные электрическим сетям с токами ОЗЗ 4,7, 16 и 24 А, а также 60 А. Все опыты проведены в предположении, что ОЗЗ происходит при максимуме напряжения поврежденной фазы.

Результаты показывают, что разряд емкости элементов поврежденной фазы в подавляющем большинстве случаев происходит в форме ВЧ-колебаний с различными частотами и амплитудами на каждом присоединении. При некотором соотношении параметров петли (образованной замкнувшейся на землю фазой питающего кабеля и подключенной к ней обмоткой электродвигателя) возникают перенапряжения в местах подключения больших индуктивных сопротивлений, и, в частности на зажимах электродвигателей. Анализ осциллограмм, полученных на зажимах электродвигателей мощностью 4,7 кВт, показывает, что перенапряжения носят характер быстро затухающих колебаний, максимальная амплитуда которых зависит от расстояния между точкой ОЗЗ и электродвигателем. Так, в диапазоне исследуемого перемещения точки ОЗЗ по длине кабеля частота колебаний на зажимах электродвигателя изменялась в пределах 18–80 кГц, а максимум перенапряжений, равный  $4,6 U_{\Phi}$ , наступил при 22 кГц. Зависимость кратности перенапряжений от частоты свидетельствует о резонансном характере этого явления.

Характер колебаний в системе *кабель – электродвигатель* существенно отличается от колебаний отдельно взятых кабеля и электродвигателя. Измерения, выполненные на различных по мощности, номинальному напряжению и конструктивному исполнению электродвигателей и разных по сечению (модельных и реальных) кабелях напряжением 6–10 кВ, показывают, что длительность колебательного процесса в системе *кабель – электродвигатель* резко возрастает при заметно меньшем его затухании. Например, при резонансной длине кабеля, питающего электродвигатель, снижение максимальной амплитуды колебаний в два раза происходит за пять периодов, в то время как при разряде одиночного кабеля такое же по величине снижение происходит всего лишь за один период колебаний, а для электродвигателя за еще более короткое время.

По мере перемещения точки измерения перенапряжений от зажимов электродвигателя кратность их снижается. Причем при перемещении в сторону питающего кабеля характер переходных процессов сохраняется неизменным, однако, величина перенапряжений резко падает. При смещении измеряемой точки в глубь обмотки

электродвигателя кратность перенапряжений несколько уменьшается и существенно изменяется характер переходного процесса. Характерным здесь является наличие двух ВЧС колебаний. Одна составляющая определяется процессом разряда емкости поврежденной фазы и имеет более высокую частоту (назовем ее ВЧС разряда). Вторая составляющая имеет частоту на один-два порядка ниже первой (назовем ее среднечастотной составляющей (СЧС) заряда). Именно на этой частоте происходит обмен энергией, запасенной в индуктивностях обмоток электродвигателя и емкостях неповрежденных фаз питающей сети. Для рассматриваемых сетей она составляет от нескольких сотен герц до 2–3 кГц.

В разных точках обмоток электродвигателя влияние каждой из указанных составляющих на величину перенапряжений различно. В начале обмотки влияние СЧС заряда незначительно и кратность перенапряжений определяется в основном наложенной на нее ВЧС разряда. На второй половине обмотки все более преобладающей (в смысле перенапряжений) становится СЧС заряда.

На величину перенапряжений большое влияние оказывают также параметры питающей сети. Если в сети с током ОЗЗ 4 А максимальная величина перенапряжений незначительно превышала рабочее напряжение сети и находилась в безопасных пределах, то при моделировании сетей с токами ОЗЗ 7 А, 16 А и 24 А получены перенапряжения с кратностью  $4,6 U_{\phi}$ ,  $5,1 U_{\phi}$  и  $6,2 U_{\phi}$ , соответственно. С увеличением емкости питающей сети в кривой напряжений появляется второй резонансный пик с меньшей величиной перенапряжений, возникающий на более высоких частотах. Так, если при моделировании сетей с токами замыкания 4 и 7 А для исследуемой удаленности точки ОЗЗ от зажимов электродвигателя этого явления не обнаружено, то с током ОЗЗ 16 А перенапряжения во второй резонансной точке составили  $3,9 U_{\phi}$ , а для сети с током замыкания 24 А они достигли пятикратной величины (рис.2а). С увеличением кратности перенапряжений по мере роста параметров сети повышается и время их воздействия на изоляцию. Этот факт хорошо прослеживается при сопоставлении осцилограмм перенапряжений, полученных на зажимах электродвигателя 4,7 кВ при моделировании сетей с токами ОЗЗ 7 и 24 А, соответственно. Возрастание длительности воздействия перенапряжений на изоляцию объясняется тем, что с увеличением емкости питающей сети снижается резонансная частота разряда поврежденной фазы, которая ведет к уменьшению активных потерь из-за поверхностного эффекта, обусловленного зависимостью активного сопротивления от частоты.

На рис.2б приведены зависимости распределения напряжений по статорной обмотке электродвигателя, построенные для резонансных длин кабеля по данным рис.2а. Характер распределения напряжений вдоль обмотки электродвигателя в переходном режиме получается крайне неравномерным, особенно это относится ко второй резонансной точке. Большая часть действующего напряжения приходится на первые витки обмотки, что даже при меньшей кратности перенапряжений, действующих на главную изоляцию, может привести к большим градиентным потенциалам и явиться причиной пробоя межвитковой изоляции.

Параметры питающей сети оказывают большое влияние также и на условия возникновения резонансных явлений в системах электроснабжения 6–10 кВ. Например, если при исследовании переходных процессов в сети с током ОЗЗ 4 А резонанс на зажимах электродвигателя имел место при длине кабеля (повредившейся фазы от зажимов до места замыкания) в пределах 2600 м, а в сети с током замыкания 7 А при длине 1700 м, то при моделировании сети с током замыкания 24 А абсолютный резонанс наступил при 600 м, а второй — при 200 м, т.е. при длинах, реально имеющих место в системах электроснабжения. Следовательно, вероятность возникновения резонансных явлений с кратностью перенапряжений, опасной для изоляции

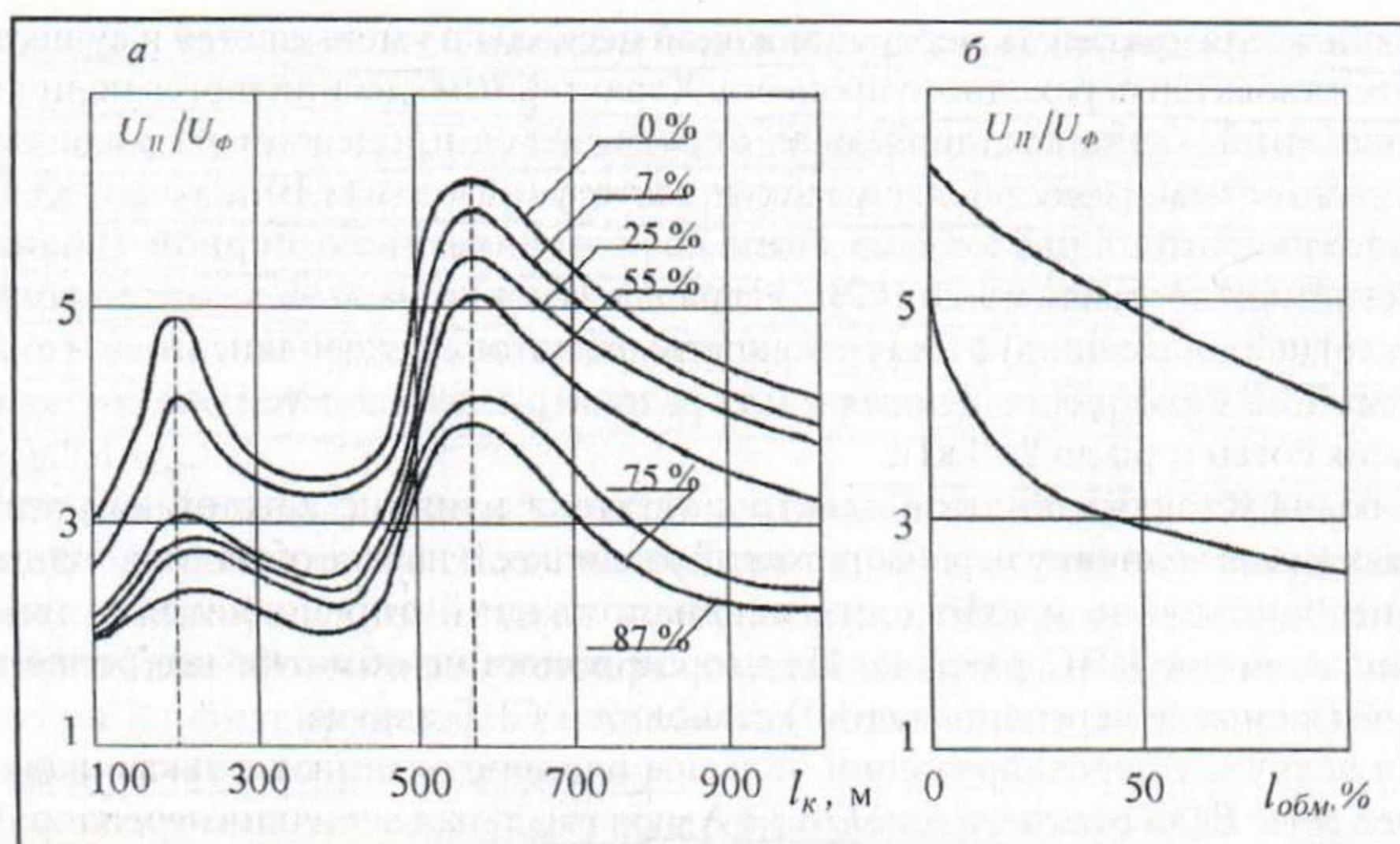


Рис.2. Кратность перенапряжений, измеренных на отпайках в %, вдоль обмотки электродвигателя 4,7 кВт в зависимости от удаления LK ее начала до места замыкания во внешней сети (а) и характер распределения напряжения по обмотке при резонансных длинах (см. пунктир) кабеля (б)

электрооборудования, возрастает с увеличением разветвленности сети и мощности электроприемников. При проведении исследований в реальных сетях также получено хорошее совпадение характера и частотных параметров переходных процессов при сходных с моделью условиях проведения опытов.

Результаты исследований показывают, что возникающие при разряде перенапряжения определяются параметрами сети и местом ОЗЗ. При некотором сочетании параметров сети относительно точки ОЗЗ перенапряжения большой кратности могут возникнуть на одном присоединении либо одновременно на нескольких, но чаще всего в местах сосредоточения больших индуктивных сопротивлений: зажимы двигателей, трансформаторов и т.д. В связи с изложенным применяемые в настоящее время способы ограничения перенапряжений, как и средства их регистрации (устанавливаемые, как правило, на шинах распределительных подстанций) оказываются неэффективными.

Успешное решение задачи по ограничению перенапряжений может быть найдено из физических представлений о характере переходного процесса при разряде емкостей поврежденной фазы и источника энергии, подпитывающих этот разряд. Так, разделение контуров, участвующих в процессе разряда и подзаряда, и минимизация энергии подпитки переходного процесса со стороны неповрежденных фаз могут быть средствами эффективного снижения опасных перенапряжений.

Разделение контуров может осуществляться включением в нейтраль сети или электродвигателя резистора, или частотнозависимых, реактивных элементов. Если ограничивать перенапряжения до величины, не превышающей линейное напряжение, при помощи резистора, то его сопротивление должно быть значительно меньше 100 Ом. Подобная мера едва ли приемлема из-за трудностей изготовления термически стойких резисторов. Приемлемым средством является включение в нейтраль сети низкоомных частотно-зависимых устройств. Применение чисто емкостных элементов ограничивается предельным значением тока ОЗЗ и в этой связи более подходит для маломощных слаборазвитых сетей. Включение высокоомных резисторов порядка 3 кОм, хотя и ограничивает перенапряжения на неповрежденных фазах, практически

не оказывает влияния на кратность перенапряжений на зажимах электродвигателей. Следовательно, минимизация энергии высокочастотных перезарядов емкостных элементов системы *кабель – электродвигатель* является наиболее эффективным мероприятием по ограничению перенапряжений.

Действительно, установка в сеть управляемых дугогасящих реакторов (ДГР) с точностью настройки на резонанс не менее 5% приводит к самоликвидации подавляющей части ОЗЗ (до 85%), в остальных 15% случаев снижает частоту следования дуговых пробоев и в этой связи существенно минимизирует длительность воздействия на изоляцию электродвигателей опасных перенапряжений. В сетях с компенсацией [6] и емкостных, и активных составляющих на дуговом промежутке происходит полное подавление дуговых процессов. Вследствие этого прекращается поступление высокочастотной энергии в резонансные контуры сети электроснабжения. С учетом этого и рекомендации [1, 2] в сетях, имеющих ток замыкания 5 А, также целесообразно использовать автоматически управляемые дугогасящие реакторы. Применение же двухканальных всережимных автокомпенсаторов [6] представляется наиболее перспективным и эффективным защитным мероприятием в сетях 6–10 кВ [2, 3] любой протяженности.

Таким образом, экспериментальные исследования, выполненные на физической модели применительно к сетям с малым и средним (до 60 А) емкостным током, показывают, что при дуговых ОЗЗ, даже в течение времени срабатывания защитной аппаратуры, возможны резонансные перенапряжения с кратностью, значительно превышающей нормы испытательных напряжений электродвигателей  $1,5\text{--}1,7 U_{\text{ном}}$ . При совпадении неблагоприятных факторов такие перенапряжения могут возникать одновременно на нескольких присоединениях, чем объясняются неоднократно наблюдаемые в эксплуатации случаи многоместных пробоев изоляции с групповым выходом электрооборудования из строя. Поскольку перенапряжения носят локальный характер, концентрируясь в основном в местах подключения больших индуктивных сопротивлений, а место их возникновения определяется параметрами сети и местом замыкания фазы на землю, то распространенные в настоящее время способы ограничения перенапряжений, как и средства их регистрации, оказываются малоэффективными.

Оптимальным методом борьбы с ВЧ-перенапряжениями является полное подавление дуговых ОЗЗ на основе быстродействующей автокомпенсации емкостных составляющих при помощи управляемых дугогасящих реакторов в сочетании с автокомпенсацией активных составляющих напряжения поврежденной фазы. Причем указанная компенсация должна осуществляться не только в нормальном режиме работы сети, но и в режимах ОЗЗ.

Подобные разработки созданы еще в 1985 году применительно к сетям 6 кВ с током ОЗЗ до 100 А на основе плунжерного дугогасящего реактора [6, 7].

Технические средства полного подавления дуговых ОЗЗ в коротких сетях 6, 10 кВ в настоящее время имеются и могут поставляться по мере спроса в виде всережимных микропроцессорных устройств УАРК.201, УАРК.201М (для воздушных сетей), а также для сетей 6 и 10 кВ с током ОЗЗ 90 А и 60 А соответственно в виде аналогичных устройств УАРК.202, созданных на основе реактора с подмагничиванием, (см. наш сайт [www.ntbe.ural.ru](http://www.ntbe.ural.ru)).

#### Литература

1. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. — М.: Энергия, 1971. — 152 с.
2. Маврицын А.М., Петров О.А. Электроснабжение угольных разрезов. — М.: Недра, 1977. — 184 с.

3. Самойлович И.С. Режимы нейтрали электрических сетей карьеров. — М.: Недра, 1976. — 176 с.
4. Вольпов К.Д., Белый Ю.В. О повреждаемости изоляции электродвигателей собственных нужд электростанций // Электрические станции. — 1976. — №11. — С.34–35.
5. Веников В.А. Теория подобия и моделирования. — М.: Высшая школа, 1976. — 497 с.
6. Обабков В.К. Синтез адаптивных систем управления резонансными объектами. — Киев: Наукова думка, 1993. — 254 с.
7. Обабков В.К., Целуевский Ю.Н. Опыт внедрения и эксплуатация автокомпенсатора емкостных и активных составляющих тока для сети 6 кВ // Энергетик. — 2002. — №6. — С.23–25.